

文章编号: 1002-0268 (2004) 08-0082-05

机非混行平面交叉口交通设计理论研究

孙明正¹, 杨晓光²

(1. 北京交通发展研究中心, 北京 100053; 2 同济大学交通工程系, 上海 200092)

摘要: 对机动车与非机动车混行条件下平面交叉口的交通设计进行深入、系统地研究。在分析大量实测数据的基础上, 对信号控制交叉口自行车交通流的运行特征进行分析, 建立自行车交通流的相关模型; 在理论分析和实践的基础上, 形成机非混行平面交叉口交通设计理论与方法。这些理论与方法的建立将为解决城市混合交通问题奠定基础。

关键词: 机非混行; 平面交叉口; 自行车; 交通设计

中图分类号: U412 351

文献标识码: A

Research on the Theory of Traffic Design for Intersection of Mixed Traffic

SUN Ming-zheng¹, YANG Xiao-guang²

(1. Beijing Transportation Development & Research Center, Beijing 100053 China;

2. Department of Traffic Engineering, Tongji University, Shanghai 200092 China)

Abstract: In this paper, there's a thorough and systemic research on the intersection traffic design in terms of the mixed traffic condition of motor vehicle and bicycle. The movement character of bicycle flow is analyzed based on mass observation data. Then a number of correlated bicycle traffic flow models are established. Based on the theory analysis and practice, some theories and methods of intersection traffic design come into being. The application of these theories and methods will be the basis of solving the urban mixed traffic problems.

Key words: Mixed traffic of motor and bicycle; Intersection; Bicycle; Traffic design

0 前言

自行车交通是我国大多数城市的主要交通方式之一。解决好自行车交通与机动车交通在城市道路交叉口混行产生的问题, 是我国城市交通状况改善的关键所在。而国内在关于自行车交通设计和控制方面, 相关的研究比较少, 因此缺乏理论上的依据和支撑。本文正是在此背景下展开研究。

1 自行车间断交通流的运行规律

国内、外对自行车交通流的研究中将自行车作为一种流体进行理论方面研究的内容比较丰富, 建立了不少相应的理论, 有些理论具有一定的应用价值。其中大部分是侧重于路段连续流的研究^[1, 7, 8]。混合交通

流在城市交通运行中产生的问题主要体现在平面交叉口, 因此研究在信号控制交叉口条件下, 自行车交通流作为间断流的交通运行特征显得尤为重要, 而这方面的内容在国内外的研究中涉及较少。

本文在分析了大量实测数据的基础上, 对信号控制交叉口自行车交通流的运行特征进行了分析, 建立了自行车交通流起动时间-速度、时间-距离模型、车流膨胀度与膨胀宽度模型以及通行能力计算模型^[2]。这些模型将为解决城市混合交通问题奠定基础。鉴于文章篇幅, 分析数据无法列出, 本文仅给出研究结论和模型。

1.1 自行车排队特征

密度是指一条车道上车辆的密集程度, 这里我们所考虑的是信号控制交叉口, 当红灯启亮车辆无法通

行时, 速度趋于零, 交通流量也趋于零时的阻塞密度。在交叉口上, 与自行车排队密度有关的因素诸多, 比如排队车辆数、车道宽度、行人个人行为、自行车尺寸、自行车动态与静态的净空宽度等等。通过大量的数据分析, 可以得出结论: 同一自行车进口道宽度和自行车停车排队密度基本为定值; 自行车停车排队密度是随进口车道宽度增加而线性递减的。

函数关系式为

$$\rho_B = 0.886 - 0.069W \quad (1)$$

相关系数 $R = 0.776$

式中, ρ_B 为交叉口进口道自行车停车密度, 辆/m²; W 为交叉口自行车进口道宽度, m。

1.2 信号控制交叉口自行车流启动时间-距离、时间-速度模型

记下自行车通过停车线后不同断面所需要的时间, 即可分析自行车启动以后行驶距离和时间的关系, 通过曲线拟合后, 可以把时距模型表达成下面的分段函数形式 (相关系数为 1)

$$L(t) = \begin{cases} 0.19t^2 + 0.68t & 0 \leq t < 3.9 \\ 2.13t - 2.79 & t \geq 3.9 \end{cases} \quad (2)$$

式中, t 为自行车的启动时间, s。

自行车瞬时速度模型在理论上相当于把自行车时距模型曲线对时间求导所得, 上面的时距关系模型对时间 t 求偏导, 即可得到交叉口自行车瞬时时速关系模型

$$V(t) = \begin{cases} 0.38t + 0.68 & 0 \leq t < 3.9 \\ 2.13 & t \geq 3.9 \end{cases} \quad (3)$$

1.3 自行车流膨胀特性

自行车在交叉口排队时, 形成密度较大的集团, 当绿灯起亮后, 排队车辆依次启动加速, 开始驶出停车线。在排队时, 自行车的横向间距很小, 1 辆自行车的占用宽度在 0.8m 左右^[1], 车辆运行起来后, 尤其是在加速过程中, 其横向间距要求增大, 这就是排队车辆的膨胀现象。当膨胀宽度过大时, 容易出现绿初先驶出停车线的自行车流挤占机动车道的现象, 对机动车流产生较大的横向影响。通过对自行车膨胀现象的研究, 建立膨胀关系模型, 可以作为交通设计的依据, 降低自行车横向膨胀对机动车的影响。

可以通过膨胀度 (κ_p) 的概念来描述自行车交通流的膨胀, 即自行车在静态停车时的横向密度与启动膨胀后的横向车流密度的比值。

$$\kappa_p = \frac{\bar{D}_b}{D_0} \quad (4)$$

式中, \bar{D}_b 为自行车启动膨胀后单车占用道路横向宽度, m; D_0 为自行车在静态停车时单车占用道路横向宽度, 一般取 0.8m。

对自行车流膨胀数据进行分析, 发现运动中自行车的单车横向占用道路宽度保持一个稳定的水平: 样本均值 $\bar{D}_b = 1.012\text{m}$, 样本方差 $s^2 = 0.017$ 。此时, 膨胀度

$$\kappa_p = \frac{1.012}{0.8} = 1.27。$$

1.4 自行车通行能力模型

自行车在信号控制交叉口的实际通过状况是: 在红灯期间自行车在停车线形成排队; 绿灯亮后, 这些自行车便起步、加速, 以集群通过停车线; 随着启动波向后传播, 排队继续加长; 通过停车线的自行车的密度随着绿灯时间的延续而减少, 车速逐渐提高, 最后, 密度趋向于与路段一致, 即绿灯期间陆续到达的自行车不断通过。

由上面的分析结果可以看出, 绿灯初期自行车的可通过流率与车道宽度应为线性关系。通过对大量观测数据的进一步分析, 可得自行车的可通过流率 s 与车道宽度的关系函数为

$$s = 0.55W + 0.41 \quad (5)$$

式中, s 为进口道自行车可通过流率, 辆/s; W 为交叉口自行车进口道宽度, m。

自行车可通过流率与进口道宽度的相关系数为 $R = 0.98$ 。由此可得, 绿灯期间自行车道饱和流量 S_B 与通行能力 Cap_B 计算公式为

$$S_B = 3600(0.55W + 0.41) \quad (6)$$

$$Cap_B = \frac{3600g}{C}(0.55W + 0.41) \quad (7)$$

式中, g 为自行车相位绿灯时间, s; C 为交叉口信号周期, s。

2 机非混行平面交叉口交通空间设计方法^{2~4}

2.1 机非混行平面交叉口空间设计理念

平面道路交叉口应贯穿自行车与行人放在同一层面进行设计的理念, 合理的交叉口混合交通布置布局方案是: 自行车与行人的通行空间在一个层面, 设施之间用行道树进行简单隔离, 行道树之间互通; 机动车在另一层面单独处理, 用绿化与自行车通行空间进行分隔。这种理念在使机动车与自行车在交叉口上的混杂程度大大降低, 又使得自行车通行空间和行人通行空间可以互相利用, 提高了交通空间的利用率。示意图见图 1。

2.2 机非混行平面交叉口空间改善设计方法

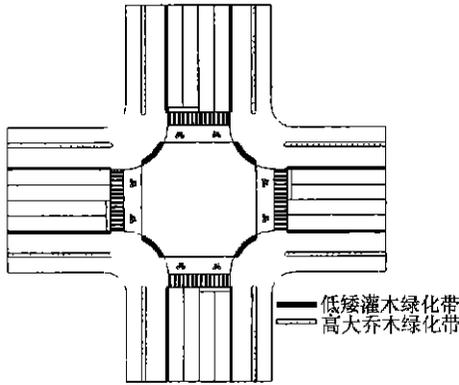


图1 机非混行平面交叉口空间设计概念图

对于国内普遍存在的设计非常简单的交叉口，一般可采用自行车左转2次过街设计和自行车停车线前移的设计方法进行改善。如图2所示。

自行车左转2次过街设计的优点有很多，主要为：(1) 消除左转自行车与机动车之间的干扰，提高自行车与机动车通过交叉口的运行速度及通行能力；(2) 减少左转自行车与直行机动车流的冲突点，冲突点位置固定，冲突方向基本垂直，有利于交通安全；(3) 设计方法比较简单；(4) 适用性较广，一般交叉口都具备设计条件。

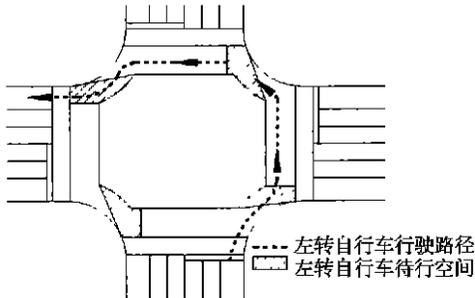


图2 左转自行车2次过街运行示意图

对于小型交叉口，高峰期的自行车与机动车之间产生较大的干扰，这些干扰主要是：自行车未能腾清路口而对下一相位机动车产生的干扰、本向直行自行车绿初因侧向膨胀占用机动车车道、左转自行车与同向机动车的干扰以及直行自行车与对向左转机动车和本向右转机动车的干扰等。为了减少以上干扰带来的损失时间，在小型交叉口中可以在进口道中划2条停车线，将自行车停车区置于机动车停车线前，减小绿灯放行自行车停车集团与机动车之间的干扰。如图3所示。

3 机非混行平面交叉口交通信号配时思路^[2,4,9]

本文将自行车交通流作为信号配时的计算因子之一，讨论混合交通流通行权都要考虑与保障条件下的

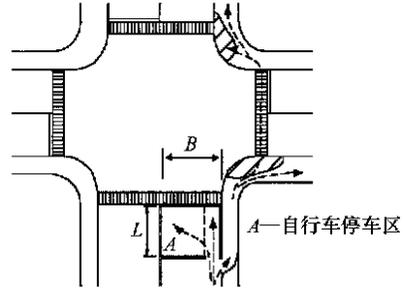


图3 小交叉口双停车线设计示意图

交叉口信号配时方法。对信号控制交叉口配时流程进行修正，配时流程如图4。

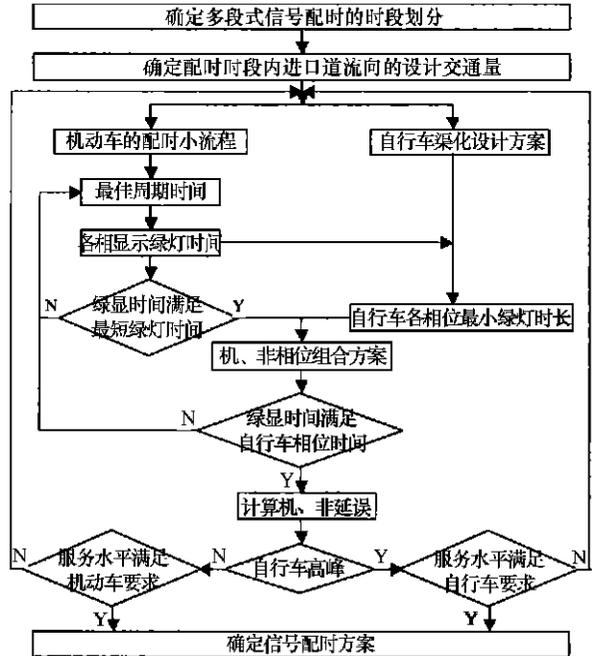


图4 考虑自行车的交叉口信号配时流程图

交叉口信号配时流程图中的主要考虑因素是，由于自行车与行人的最大等待时间一般较小，交叉口进口道不应出现自行车的2次排队的现象。同时由于自行车交通的高峰时间相对十分集中且短暂，在自行车高峰时间，应以自行车交通流作为信号配时的关键因素。相应的有关自行车交通流的相关参数如：自行车最短绿灯时长、自行车延误等的计算方法在参考文献[2]中有详细的论述。

4 机非混行平面交叉口交通设计评价^[4]

目前，自行车交通设计尚无准确、全面的评价方法，本文希望从不同的分析角度建立适合混合交通流的交通设计评价方法。下面从3个方面着手，分别展开研究。

4.1 基于机动车交通效益的评价方法

交叉口交通设计的效益，直接体现在机动车流的

行驶顺畅、效率提高。因此,通过对机动车交通效益的评价,间接反映自行车交通设计的效益,是一种简单可行的评价方法。在这方面,国内已有比较深入的研究^[5],本文在总结前人研究成果的基础上,建立了进行自行车修正的机动车通行能力计算模型,具体算法参见参考文献[2],这里不再详细阐述。

4.2 交叉口综合效益评价方法

随着交通控制向实时化、智能化的发展,对自行车交通的评价也必然要纳入综合评价体系。结合先进的交通控制与管理系统(TJATCMS)的开发,建立了考虑自行车优化设计的交叉口综合效益指标的评价计算方法。概念模型如下

$$PI = \sum_{i=1}^n (E \cdot L \cdot \omega_i \cdot d_i + E \cdot L_p \cdot \xi_i \cdot p_i + E \cdot L' \cdot \omega'_i \cdot d'_i) \quad (8)$$

式中, PI 为综合效益指标; $E \cdot L'$ 为每辆自行车延误单位时间的经济损失; ω'_i 为第 i 条连线上自行车延误时间的加权系数; d'_i 为第 i 条连线上自行车总延误时间; n 为连线的总数目(对于单点交叉口可理解为总的流向数目)。其它参数说明详见参考文献[7]。

4.3 交叉口安全度评价方法。

安全度是描述交叉口交通流运行状态下,各股交通流的安全性的指标,在交叉口的交通流运行中,存在两种不同概念的安全度。

(1) 相位衔接时的安全度概念

相位首尾衔接时的安全度是体现交叉口相位衔接时交通流之间安全性的概念,计算如下式

$$d. s. p = \frac{T_D}{T_{D_r}} \quad (9)$$

式中, $d. s. p$ 为相位衔接时的安全度; T_D 为相位衔接时的安全间隔时间; T_{D_r} 为实际相位衔接的间隔时间。

(2) 相位内交通流混合冲突与交织时的安全度概念

安全的问题还源于相位内部不同流向交通流在运行时产生的交织与冲突过程中。冲突点上的安全度与通过该冲突点的两股冲突交通流的流率有直接的关系,与通过交叉口的出行者的交通行为也有密切的关系。因此,建立下面的冲突点安全度计算模型

$$d. s. m = \beta \cdot F [f(q_1, q_2), g(v, a)] \quad (10)$$

式中, $d. s. m$ 为相位内交通流混合冲突或交织点的安全度; q_1 、 q_2 为冲突流向一、二的流率; v 、 a 为车流在冲突点处的运行速度和加速度; β 为考虑出行者交通行为的安全度修正系数,在此简单假设出行者

的遵章率与安全度呈线性关系; $F()$ 、 $f()$ 、 $g()$ 为对应于不同参数的函数关系式。

交叉口的安全度计算模型为

$$D. S = \sum_{i=1}^n d. s. m_i + \sum_{j=1}^m d. s. p_j = \sum_{i=1}^n \beta_i \cdot F [f(q_{1i}, q_{2i}), g(v_i, a_i)] + \sum_{j=1}^m d. s. p_j \quad (11)$$

式中, $D. S$ 为交叉口上的安全度; n 为交叉口上实际冲突点的个数; m 为一个信号周期内的相位衔接数。

5 交通设计存在的误区

5.1 倒计时信号灯控制的优缺点分析

采用倒计时的信号控制,虽然会降低机动车绿初的损失时间,但这种机动车运行效率的提高并不利于整个交叉口混合交通的运行。采用倒计时,机动车可以提早启动,启动损失接近0,易造成左转机动车抢先通过与自行车的冲突点,自行车无法通过,从而阻挡同向右转机动车,会造成整个交叉口秩序的混乱。

另外,在自适应控制交叉口,由于信号周期和相位时间是随实际流量在改变的,这种改变表现在信号周期及相位时间上是突变,而这种突变在实际的倒计时灯上无法实现,因为其时间必须是一个连续的。这就容易造成实际的信号相位时间已发生了改变,但计时牌却仍然显示倒计时未完的时间,一方面会造成信号控制的混乱,也很容易引发交通事故。

5.2 自行车与机动车共用左转相位效益分析

当交叉口信号控制方案中设置了机动车左转相位,可以将左转自行车与直行自行车分离控制,左转自行车在机动车左转相位内放行。这种控制方法有没有问题?比自行车2次过街设计方法能带来效益上的提高吗?下面对这一问题给予简单的分析。

(1) 自行车进口道的通行效率

当左转自行车在机动车左转相位内放行时,自行车的直行通行相位内必然有等待左转的自行车在进口道停车,此时必然影响自行车进口道的通行能力。20m宽道路相交的交叉口为例(自行车进口道为3m宽),进行简单的量化比较。

从表1可以看出,左转自行车在交叉口进口道停车对自行车直行相位的通行能力影响很大,而通行能力损失的部分完全能够容纳左转自行车2次过街转为直行的交通量。

表1 左转自行车与机动车同相位放行时
交叉口通行能力分析表

信号周期时长	直行自行车相位时间	自行车进口道宽度	左转自行车停车占用进口道宽度	单进口道自行车通行能力/辆	交叉口自行车通行能力/辆	
自行车左转与机动车结合	80	20	3	1	1359	5436
左转2次过街	80	20	3	0	1850	7400
比较					+491/ +36%	+1964/ +36%

(2) 信号控制相位、相序的灵活性

由于自行车对相位有最短时间的要求，当左转自行车在机动车左转相位内放行时，必须分别确定左转与直行自行车各自的最短相位时间，这样必然加大交叉口最小周期。

当左转自行车在机动车左转相位内放行时，考虑相位衔接时的因素更为复杂，相位衔接的损失时间也会加大，这对交叉口的信号控制是十分不利的。

由上面两点分析可以得出以下结论：左转自行车在机动车左转相位内放行，并不能提高交叉口自行车的通行能力，反而会使交叉口的信号控制周期加大，相位、相序组合的灵活性降低，交叉口时间资源无法得到充分利用，各种交通方式的延误也会增大。

6 交通设计方法实效分析^[2,4]

通过实践验证和理论计算的方法对自行车左转两次过街设计和自行车停车线前移设计方法的效益进行分析。

通过对四川省成都市多个交叉口的实测数据进行分析，得出的结论是：采用自行车左转2次过街设计方法，在满足高峰时间自行车正常通行的前提下，机动车的通行能力提高在10%以上，延误降低在5%以

上^[4]。

以绍兴市胜利路、解放路的交叉口为例对双停车线设计方法交通效益进行量化分析。在相同的配时条件下，自行车的通行能力可以提高22%，机动车的通行能力可以提高19%^[2]。

7 结论

本文通过对城市信号控制交叉口自行车交通设计理论与方法的研究，建立了多方面的设计理论与方法，为自行车交通设计、管理和控制提供相应的理论支持，为改善我国各城市普遍存在的机非交通流混合的交通问题提供科学的依据。

同时，由于实践的滞后性，论文中的一些自行车交通设计理论与方法尚未得到实践的验证，需要在以后的研究和应用中进行实证和修正。

参考文献:

[1] 彭锐. 自行车交通流理论 [D]. 同济大学博士生毕业论文, 1987.
 [2] 孙明正. 信号控制交叉口自行车交通设计理论研究 [D]. 同济大学硕士生毕业论文, 2003.
 [3] 曾静康. 城市平面交叉口交通设计中的若干问题研究 [D]. 同济大学博士生毕业论文, 1990.
 [4] 杨晓光, 孙明正, 等. 自行车交通规划设计与控制管理方法研究 [R]. 同济大学交通工程系, 2003.
 [5] 上海市工程建设规范. 城市道路平面交叉口规划与设计规程 [S]. 上海: 2001.
 [6] 全永. 城市交通控制 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1989.
 [7] Taylor D, Davis W. Review of Basic Research in Bicycle Traffic Science, Traffic Operations, and Facility Design [J]. Transportation Research Record 1674, 102-110.
 [8] John Forester Bicycle Transportation [M]. London, England: The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1983.